8Б

УДК 004.93'12

Н.В. Белоус, Г.А. Кобзарь
Харьковский национальный университет радиоэлектроники, г. Харьков, Украина, belous@kture.kharkov.ua.

Метод быстрого построения масштабно-пространственных представлений кривизны для распознавания форм в условиях ограниченного времени

Предлагается введение секторного *m*-веса для оценки кривизны дискретных контуров объектов на изображениях. Разработан метод быстрого формирования дескрипторов масштабно-пространственного представления кривизны на основе адаптивного упрощения дискретной кривой путем расчета и анализа секторных *m*-оценок кривизны. Разработанный метод позволяет контролировать точность оценки и скорость формирования дескриптора, что особенно важно в системах машинного зрения реального и ограниченного времени.

Введение

Подавляющее большинство исследователей и ученых в области зрительного восприятия соглашаются с тем, что распознавание формы объектов является наиболее важным процессом для понимания изображений. Кроме того, существует множество практических задач, для которых процесс распознавания изображения может быть сведен к анализу формы объектов (например, текстовые документы и различные надписи, органы тела и клетки на медицинских снимках, части механизмов, участники дорожного движения и многие другие).

Разработка информативного представления формы (дескриптора формы) геометрических объектов является одной из основных задач при построении систем распознавания геометрических объектов по форме. В рамках разработки стандарта «Интерфейс представления мультимедийных данных» группой экспертов MPEG (Moving Picture's Experts Group) в 1998 году, больше известного под названием MPEG-7, были выдвинуты новые критерии оценки дескрипторов формы: инвариантность, устойчивость, компактность, вычислительная простота формирования, возможность и вычислительная сложность сравнения.

Дескриптор масштабного пространства кривизны (МПК) является одним из четырех, успешно прошедших официальные испытания в рамках разработки стандарта MPEG-7. Именно этот дескриптор наиболее полно отображает локальные признаки формы [1].

Несмотря на то что методы распознавания геометрических объектов на основе масштабного пространства кривизны (МПК) получили широкое распространение при решении самых различных практических задач [1-5], предложенный изначально метод построения дескриптора МПК обладает двумя недостатками: отображение только вогнутых сегментов формы, низкая (по сравнению с другими дескрипторами) скорость построения дескриптора. Проблема отображения выпуклых сегментов формы дескриптора МПК решена в [6] путем проецирования на окружность, а в [7] – путем введения межмасштабного проецирования.

Таким образом, применение МПК позволяет учесть как локальные, так и глобальные особенности формы на различных уровнях детализации, а также для частичного распознавания, однако построение МПК требует довольно трудоемких вычислений из-за использования оператора гауссовой свертки увеличивающимся ядром.

Целью данной работы является разработка метода быстрого построения МПК формы объектов, представленных на изображениях. Разработка быстрого метода формирования признаков дескриптора может открыть новые возможности практического применения дескриптора МПК в системах реального времени и ограниченных сроков выполнения. Предлагается введение секторного *m*-веса для оценки кривизны дискретных контуров объектов, а также метода быстрого формирования дескрипторов МПК на основе адаптивного упрощения дискретной кривой путем расчета и анализа секторных *m*-оценок кривизны.

1. Аппроксимация кривизны при построении масштабно-пространственных представлений

Для построения изображений МПК необходимо вычисление функции кривизны. Если непрерывная кривая задана уравнением в явной форме $y = y(x)$, то кривизна вычисляется по формуле $k = \left|\ddot{y}/(1+\dot{y}^2)^{3/2}\right|$. Формула кривизны для параметрически заданной замкнутой кривой контуров геометрических объектов $\Gamma = \{(x(u), y(u) \mid u \in [0,1]\}$ также достаточно проста [1]:

$$k(u) = \frac{\dot{x}(u)\ddot{y}(u) - \ddot{x}(u)\dot{y}(u)}{(\dot{x}^2(u) + \dot{y}^2(u))^{3/2}}.$$

Однако при восстановлении контуров геометрических объектов на бинарных изображениях в результате получаем только дискретную кривую. Такая дискретная кривая в общем случае может содержать разрывы и отдельно стоящие, «выбитые» точки. Как дифференциальная характеристика кривизна является очень неустойчивой к дискретизации и зашумлению изображения. Поэтому для обеспечения приемлемой помехоустойчивости при построении МПК функцию кривизны будем оценивать косвенно.

В данной работе рассматриваются два способа оценивания кривизны, пригодные для обработки зашумленных изображений: метод геометрического сглаживания, разработанный в [8], а также аппроксимативный метод. Оценки кривизны, получаемые с помощью этих методов, обозначены k_m^g, k_m^a соответственно.

Без ограничения общности можно считать, что кривая проходит через начало координат и кривизна оценивается в начале координат. Под *m*-оценкой функции кривизны кривой будем понимать функцию k_m, зависящую от параметра $m > 0$, которая удовлетворяет условиям $\lim\limits_{m \to +0} k_m = k$. Как правило, параметр $m > 0$ определяет степень гладкости функции кривизны.

Метод геометрического сглаживания состоит в следующем. Пусть оценивается кривизна плоской без самопересечений кривой γ, проходящей через начало координат и Q_m, *m* – окрестность начала координат $(m \in N)$ в некоторой метрике ρ. Вычислим *m*-вес кривой γ по формуле:

$$v_m = \left|S_m - \bar{S}_m\right| \big/ \max(S_m, \bar{S}_m), \tag{1}$$

где $S_m, \overline{S}_m$ – площади фигур, ограниченных окрестностью Q_m и кривой γ.

Тогда в евклидовой метрике имеет место асимптотическая формула:

$$k = 3\pi v_m / (4m) + O(m),\ m \to 0.$$

Поэтому m-оценка функции кривизны в методе геометрического сглаживания вычисляется по формуле $k = 3\pi v_m / (4m)$.

В аппроксимативном методе исходная дискретная кривая в m-окрестности начала координат аппроксимируется аналитически задаваемой непрерывной кривой, параметры которой могут быть оценены, например, методом наименьших квадратов. В качестве аппроксимирующих кривых удобно использовать, в частности, окружность $(x-a)^2 + (y-b)^2 = r^2$ с параметрами a, b, r или полиномом второго порядка вида $y = c_0+c_1x+0,5c_2x^2$.

Использование для аппроксимации указанного полинома второго порядка эквивалентно применению процедуры сглаживания в окрестности начала координат оцифрованных значений кривой $y_k\ (k = -m,...,m)$ с помощью многочлена второго порядка $c_0+c_1k + 0.5c_2k^2 \approx y_k$ для регуляризации процедуры численного дифференцирования. Коэффициенты c_1, c_2 при этом являются оценками значений первой и второй производной оцифрованной кривой в начале координат.

Тогда аппроксимативную m-оценку кривизны можно вычислить по формуле $k_m^a = \left| c_2 / (1+c_1^2)^{3/2} \right|$. Зная оценку кривизны, можно также найти оценки координат центра аппроксимирующей окружности радиуса $r_m = 1/k_m^a$ по формулам:

$$a^* = \mp c_1 r_m / \sqrt{1 + c_1^2},\ b^* = \mp r_m / \sqrt{1 + c_1^2}.$$

Достоинством аппроксимативного метода является быстрота вычисления кривизны по сравнению с методом геометрического сглаживания. Однако метод геометрического сглаживания может быть более полезен для быстрого вычисления оценочных значений функции кривизны с заданной точностью, поскольку доказано, что точность оценки кривизны с помощью метода геометрического сглаживания зависит от соотношения радиуса кривизны контура (величина которого обратна действительному значению кривизны) и размера окрестности [8].

Можно вычислять оценки кривизны с помощью метода геометрического сглаживания достаточно быстро, рассматривая не все изображение, а только контур, если действительное значение кривизны или размер окрестности невелики.

2. Введение и анализ секторной m-оценки

Предлагается следующая формулировка m-веса кривой, с помощью которой можно сформулировать и оценку кривизны, удовлетворяющую требованию $\lim_{m \to +0} k_m = k$, для вычисления которой необходимы только точки контура.

Лемма 1. Пусть m – окрестность точки $\gamma(u) = (x(u), y(u))$, в которой оценивается m-вес кривой Γ, заданной в параметрическом виде $\Gamma = \{(x(u), y(u) \mid u \in [0, L]\}$. Тогда имеет место следующая асимптотическая формула $v_m = v_m^o + O(m), m \to 0$, причем v_m^o вычисляется по следующей формуле:

$$v_m^o = \left| S_m^o - \overline{S}_m^o \right| \Big/ \max(S_m^o, \overline{S}_m^o), \qquad (2)$$

где $S_m^o, \overline{S}_m^o$ – площади секторов окружности с радиусом Δu:

$$S_m^o = \pi m^2 \angle(\overrightarrow{v^-}(u), \overrightarrow{v^+}(u)) / 360^o$$
$$\overline{S_m^o} = \pi m^2 \angle(\overrightarrow{v^+}(u), \overrightarrow{v^-}(u)) / 360^o, \quad (3)$$

где $\overrightarrow{v^-}(u)$ – вектор, соединяющий точку кривой $\gamma(u)=(x(u),y(u))$ и $\gamma^-(u)=(x(u-m),y(u-m))$; $\overrightarrow{v^+}(u)$ – вектор, соединяющий точку кривой $\gamma(u)=(x(u),y(u))$ и $\gamma^+(u)=(x(u+m),y(u+m))$ (рис. 1).

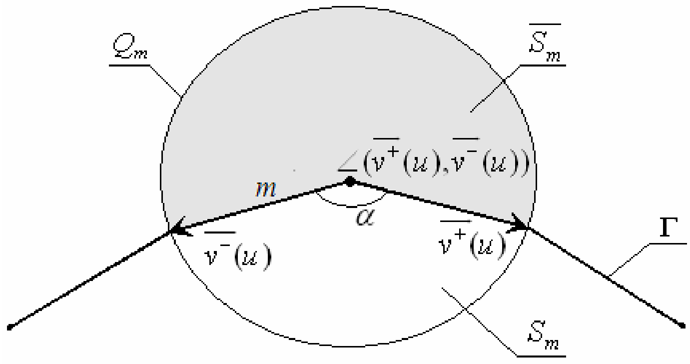


Рисунок 1 – Окрестность для *m*-оценки функции кривизны кривой контура

Доказательство. Разобъем кривую Г на отрезки с длиной хорды Δu, иными словами, отрезки, начальные и конечные точки которых находятся на одинаковом расстоянии Δu в евклидовой метрике.

Тогда в окрестности $m = \Delta u$ кривая состоит из двух равных отрезков прямой, расположенных под некоторым углом друг к другу (рис. 1) и в соответствии с определением *m*-веса, а также формулой (1) *m*-вес в точке $\gamma_{\Delta u}(u) = (x(u), y(u))$ полученной ломаной кривой $\Gamma_{\Delta u}$ вычисляется по формуле (2). А поскольку $\lim\limits_{\Delta u \to +0} \Gamma_{\Delta u} = \Gamma$, то $\lim\limits_{\Delta u \to +0} v_m^o = v_m$, т.е. v_m^o действительно является оценкой v_m, что и требовалось доказать.

Сформулированную оценку *m*-веса кривой v_m^o назовем секторной оценкой.

Можно упростить формулы (3), полагая $\alpha = \angle(\overrightarrow{v^-}(u), \overrightarrow{v^+}(u))$, $\beta = \angle(\overrightarrow{v^+}(u), \overrightarrow{v^-}(u))$ углы в радианах:

$$S_m^o = m^2\alpha, \overline{S_m^o} = m^2\beta .$$

Подставляя S_m^o и $\overline{S_m^o}$ в (2), а также учитывая, что для построения МПК необходимо не только значение кривизны по модулю, но и направление искривления, получаем:

$$v_m^o(m) = \left(m^2\alpha - m^2\beta\right) / \max(m^2\alpha, m^2\beta)$$
$$v_m^o(m) = m^2\left(\alpha - \beta\right) / m^2 \max(\alpha, \beta) \quad .$$
$$v_m^o(m) = \left(\alpha - \beta\right) / \max(\alpha, \beta)$$

А поскольку $\beta = 2\pi - \alpha$:

$$v_m^o(m) = 2(\alpha - \pi)/\max(\alpha, 2\pi - \alpha). \quad (3)$$

Лемма 2. Пусть $m = \Delta u$ – окрестность точки, в которой оценивается кривизна кривой Γ, заданная в параметрическом виде $\Gamma = \{(x(u), y(u) \mid u \in [0, L]\}$. Тогда имеет место следующая асимптотическая формула:

$$k = 3\pi v_m^o / (4m) + O_m^o(m),\ m \to 0. \quad (4)$$

Доказательство. Поскольку $k = \lim_{m \to 0} 3\pi v_m / (4m)$, а $v_m = \lim_{m \to 0} v_m^o$, то $k = \lim_{m \to 0} 3\pi v_m^o / (4m)$, а значит, лемма 2 – верна.

Для удобства назовем m-оценку функции кривизны с помощью секторного m-веса $k_m^o = 3\pi v_m^o / (4m) \approx k$ секторной m-оценкой кривизны. Очевидно, точность секторной m-оценки кривизны тем выше, чем больше радиус кривизны и чем меньше размер окрестности.

Лемма 3. Можно утверждать, что оценивая кривизну с помощью секторной m-оценки, можно добиться нахождения оценки k_m^o с заданной точностью путем введения следующего ограничения:

$$v_m^o < \xi_m^o, \quad (5)$$

где ξ_m^o – некоторый порог m-веса.

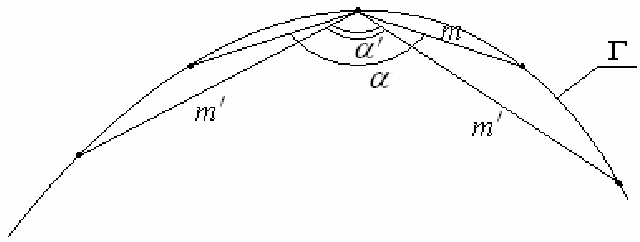


Рисунок 2 – Окрестность секторной m-оценки функции кривизны кривой контура

Доказательство. Поскольку k_m^o является оценкой кривизны $k = \lim_{m \to 0} k_m^o$, то ошибка секторной оценки $\lim_{m \to 0} O_m^o(m) = 0$, т.е. $O_m^o(m) < O_m^o(m')$, тогда и только тогда, когда $m < m'$. Кроме того, $v_m^o(m) < v_m^o(m')$ в некоторой определенной точке кривой $\gamma_{\Delta u}(u) = (x(u), y(u))$ тогда и только тогда, когда $m < m'$. Поэтому для любого m', такого что $v_m^o \geq \xi_m^o$, можно найти такое $m < m'$, что неравенство $v_m^o < \xi_m^o$ выполняется. Лемма доказана.

Лемма 3 имеет двойное значение для построения изображений МПК и соответствующего дескриптора. Во-первых, изменяя окрестность m, можно контролировать точность m-оценки кривизны в точках кривой контура.

Во-вторых, поскольку при $k \to 0$ ошибка секторной оценки $O_m^o \to 0$, можно утверждать, что для нахождения точек перехода кривизны через ноль можно изначально брать окрестности m минимальной величины. Кроме того, для точек с небольшой кривизной можно брать небольшие окрестности m, гарантируя при этом нахождение оценки кривизны с заданной точностью и быстродействием.

3. Разработка метода адаптивной дискретизации для быстрого формирования дескриптора МПК

Для получения быстрой оценки кривизны с заданной точностью можно связать окрестность m и шаг Δu дискретизации кривой контура $\Gamma = \{(x(u), y(u) \mid u \in [0, L]\}$.

Очевидно, после трассировки связных компонентов бинарных изображений кривая Γ контура реального геометрического объекта представлена дискретной кривой, заданной в параметрическом виде $\Lambda(u) = \{(x(u), y(u)) \mid u, \Delta u \in [0, L_u],\ u\ (\mathrm{mod}\,\Delta u) \equiv 0\}$, причем $\Delta u = 1$. То есть кривая представлена множеством точек $\Lambda = \{(x_i, y_i) \mid i \in [0, M_u]\}$, $M_u = L_u / \Delta u$, причем расстояние между любыми двумя точками λ_i и λ_{i+1} множества Λ равно

$$\|\lambda_i - \lambda_{i+1}\| = \Delta u = 1,$$

где $\|\cdot\|$ – евклидова метрика.

Для построения дискретного представления МПК, инвариантного к масштабированию, нормируют количество M_u точек кривой Λ, отбрасывая или добавляя новые точки до некоторого общего значения M, т.е. приводят $|\Lambda| = M$ [85, 86]. При этом принимают $L = M$ в качестве новой длины контура.

Кроме того, выбирают шаг дискретизации по масштабу $\Delta\sigma$. Тогда представление точек кривой Λ на масштабе σ, таком, что $\sigma(\mathrm{mod})\Delta\sigma \equiv 0$ (или $\sigma = \Delta\sigma \cdot j, j \in N$), может быть легко найдено по следующей формуле дискретного приближения гауссовой свертки:

$$x_i^\sigma = \sum_{j=-[M/2]}^{j<[M/2]} x_{i-j} g(i-j,\sigma), \quad y_i^\sigma = \sum_{j=-[M/2]}^{j<[M/2]} y_{i-j} g(i-j,\sigma),$$
$$g(x;\sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-x^2/2\sigma}. \qquad (6)$$

Причем $x_{i-j}^0 = x_{i-j}$, $y_{i-j}^0 = y_{i-j}$.

Для построения МПК необходимо найти значения функции кривизны во всех M точках дискретной кривой для каждого из N_σ уровней масштаба. Вычисление положения некоторой λ_i точки на уровнях масштаба $\sigma > 0$ согласно (6) требует $O(M^2)$ операций, тогда как согласно правилу 3σ только точки в окрестности 3σ вносят значимый вклад в суммы (6). Можно преобразовать формулы (6) к следующему виду для значительного уменьшения количества операций, что является обычной практикой при использовании гауссовой свертки в дискретных пространствах:

$$x_i^\sigma = \sum_{j=-[3\sigma]}^{j<[3\sigma]} x_{i-j} g(i-j,\sigma), \quad y_i^\sigma = \sum_{j=-[3\sigma]}^{j<[3\sigma]} y_{i-j} g(i-j,\sigma). \qquad (7)$$

Таким образом, при максимальном количестве уровней, на которых необходимо вычисление точек кривой (а это количество на практике зависит от того, как быстро на кривой не останется ни одной точки перехода кривизны через ноль) $\sigma = M/3$ для некоторого $\Delta\sigma$, средняя сложность вычислений каждого уровня будет порядка $O(M^2/2)$.

Поскольку для выявления максимумов МПК необходимы все уровни масштаба, можно применить еще одно свойство гауссовой свертки:

$$(f(x)\times g(x,\sigma_1))\times g(x,\sigma_2)=f(x)\times g(x,\sqrt{\sigma_1{}^2+\sigma_2{}^2}).$$

Пусть σ_i – уровень масштаба, дискретная кривая $\Lambda^{\sigma(i)}$ которого уже вычислена. Для вычисления кривой $\Lambda^{\sigma(i+1)}$ следующего уровня масштаба в соответствии с выбранным $\Delta\sigma$ необходимо выполнить гауссову свертку кривой $\Lambda^{\sigma(i)}$ с ядром σ^+, размер которого можно вычислить по следующей простой формуле:

$$\sigma^+=\sqrt{\sigma_{i+1}{}^2-\sigma_i{}^2}\,. \tag{8}$$

Таким образом, для нахождения кривых всех уровней масштаба, необходимых для построения дискретного представления МПК, можно использовать следующую итеративную схему вычислений:

$$\begin{gathered}\Lambda^0(u)=\Lambda(u)\\ \Lambda^{\Delta\sigma}(u)=\Lambda^0(u)\times g(u,\Delta\sigma)\\ \dots\\ \Lambda^{\sigma}(u)=\Lambda^{\sigma-\Delta\sigma}(u)\times g(u,\sqrt{\sigma^2+(\sigma-\Delta\sigma)^2})\end{gathered}\,.$$

Это позволяет свести среднюю сложность вычислений каждого уровня к порядку $O(M\cdot\sqrt{M})$ при максимальном количестве уровней (вплоть до $\sigma=L/3$), на которых необходимо вычисление точек кривой.

После вычисления кривой каждого масштаба непосредственно оценку кривизны можно рассчитать с помощью введенного секторного *m*-веса кривой. Угол α_i^σ для точки $\lambda_i\in\Lambda^\sigma$ кривой на некотором уровне масштаба $\sigma=\Delta\sigma\cdot j,\ j\in N$, можно рассчитать как:

$$\alpha_i^\sigma=\arccos\Big((x_i^\sigma-x_{i-1}^\sigma)(x_{i+1}^\sigma-x_i^\sigma)+(y_i^\sigma-y_{i-1}^\sigma)(y_{i+1}^\sigma-y_i^\sigma)\Big)/|\overrightarrow{v_+^\sigma}||\overrightarrow{v_-^\sigma}|, \tag{9}$$

где $\overrightarrow{v_+^\sigma}=\lambda_{i+1}^\sigma-\lambda_i^\sigma$;

а $\overrightarrow{v_-^\sigma}=\lambda_i^\sigma-\lambda_{i-1}^\sigma$.

После чего несложно рассчитать секторный *m*-вес v_m^o и оценку кривизны k_m^o точки λ_i^σ по формулам (3) и (4).

При рассмотрении такого подхода построения МПК возникает задача, какой величины окрестность *m*, количество точек M нормированной дискретной кривой и шаг дискретизации масштаба $\Delta\sigma$ необходимо выбрать, чтобы получить удовлетворительную оценку МПК. Очевидно, прямого решения этой задачи не существует, поскольку сложно оценить, насколько точной должна быть оценка МПК для решения конкретных задач распознавания, однако предлагаемый подход построения МПК на основе секторной m-оценки функции кривизны дает возможность выбирать между точностью построенной МПК и быстродействием путем изменения величины окрестности *m* и количества точек M.

Предлагается следующий метод построения изображений МПК на основе адаптивного бинарного упрощения кривой контура и вычисления секторного *m*-веса, окрестность *m* которого может быть связана с уровнем упрощения кривой.

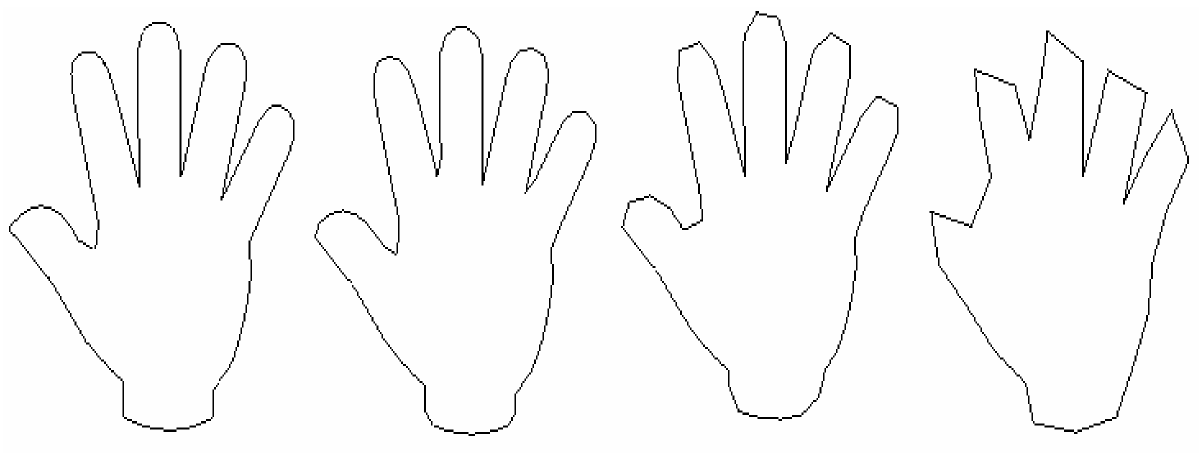
Для нахождения оценок функции кривизны контура на всех уровнях масштаба на первом шаге нормируем кривую контура таким образом, чтобы длина дискретной кривой и количество точек были кратны 2: $L = M = 2^N, \Delta u = 1$.

Определение 1. Бинарное упрощение дискретной кривой – операция исключения каждой второй точки из множества Λ^σ точек кривой на некотором уровне масштаба σ. То есть множество Λ^σ_η точек упрощенной кривой может быть найдено как:

$$\begin{gathered}\Lambda^\sigma_\eta = \{\lambda_i \in \Lambda^\sigma_{\eta-1} \mid i = [0, M_{\eta-1}], i(\mathrm{mod})2 \equiv 0\} \\ \Lambda^\sigma_0 = \Lambda^\sigma\end{gathered}. \quad (10)$$

Определение 2. Уровень упрощения η дискретной кривой Λ^σ_η на масштабе σ равен количеству упрощений в соответствии с (10), произведенных для получения кривой Λ^σ_η из кривой Λ на всех уровнях масштаба $\sigma' < \sigma$. Очевидно $\eta \le \log_2(M)$.

Примеры упрощения кривой на различных уровнях для масштаба $\sigma = 0$ приведены на рис. 3. Видно, что уровни упрощения $\eta \le 2$ (рис. 3 а), б), в)) практически не искажают форму геометрического объекта. Упрощение на уровнях $\eta \ge 3$ на данном масштабе (рис. 3 г) уже неприемлемо.



а) б) в) г)

Рисунок 3 – Упрощение кривой контура на различных уровнях:
а – $\eta = 0$, б – $\eta = 1$, в – $\eta = 2$, г – $\eta = 3$

Предлагается вычислять кривые следующих уровней в зависимости от уровня упрощения, используя при развитии кривой только те точки, которые сохранились после бинарных упрощений на предыдущих уровнях:

$$x_i^\sigma = \sum_{i \in \left\{\lambda_j \in \Lambda_\eta^{\sigma-\Delta\sigma} \| x_i^{\sigma-\Delta\sigma} - x_j \| < 3\sigma^+\right\}} x \cdot g(\| x - x_i^{\sigma-\Delta\sigma} \|, \sigma^+), \quad (11)$$

где x_i^σ – первая координата искомой точки $\lambda_i \in \Lambda_\eta^\sigma$ кривой на масштабе σ при уровне упрощения η;

σ^+ – ядро свертки, необходимое для получения кривой Λ_η^σ из кривой $\Lambda_\eta^{\sigma-\Delta\sigma}$, рассчитывается по формуле (8).

Аналогично вычисляются y_i^σ.

Бинарное упрощение кривой на определенных уровнях масштаба позволяет значительно сократить количество операций при построении МПК (в 2^η раз при η упрощениях), но уменьшает точность оценки МПК. Однако можно показать, что для нахождения максимумов МПК с заданной точностью оценки кривизны такие упрощения могут быть вполне оправданы.

Введем порог ξ_m^o для *m*-веса кривых. Будем упрощать кривую каждый раз во время итеративного развития в соответствии с формулой (10), когда максимальный вес точек кривой оказывается ниже некоторого порога:

$$\max_{\lambda_i \in \Lambda_\eta^\sigma} v_m^o(\lambda_i) < \xi_m^o + \Delta\xi , \qquad (12)$$

где $v_m^o(\lambda_i)$ – значение *m*-веса кривой Λ_η^σ в точке λ_i;

$\Delta\xi$ – добавочный элемент, который гарантирует выполнение условия $v_m^o(\lambda_i') < \xi_m^o$, $\lambda_i' \in \Lambda_{\eta+\Delta\eta}^{\sigma+\Delta\sigma}$ на кривой следующего масштаба и уровня упрощения.

Согласно лемме 3 это гарантирует вычисление оценки кривизны с помощью секторного *m*-веса кривой Λ_η^σ с заданным уровнем точности. Фактически, упрощение кривой происходит тогда, когда кривая сглаживается так, что максимальная оценка кривизны $v_m^o(\lambda), \lambda \in \Lambda_\eta^\sigma$ точек дискретной кривой снижается до некоторого заранее установленного уровня $C \cdot \xi_m^o$ и упрощение кривой не приводит к повышению максимальной оценки кривизны кривой $v_m^o(\lambda), \lambda \in \Lambda_{\eta+\Delta\eta}^{\sigma+\Delta\sigma}$ выше некоторого другого уровня $C \cdot (\xi_m^o + \Delta\xi)$, $C = 4m/3\pi$ на следующем масштабе.

Выводы

В статье предложена оценка кривизны в точках дискретных кривых на основе расчета секторного *m*-веса – секторная оценка. Доказано, что ошибка секторной оценки кривизны зависит не только от радиуса окрестности, но и от значения кривизны, причем с уменьшением значения оценки кривизны уменьшается и ошибка такой оценки, что позволяет уменьшать количество анализируемых точек при построении масштабно-пространственных представлений кривизны в процессе перехода на более низкие уровни масштаба.

Таким образом, введение секторного *m*-веса для оценки кривизны дискретных контуров объектов позволили разработать и обосновать метод быстрого формирования дескрипторов масштабно-пространственного представления кривизны на основе адаптивного упрощения дискретной кривой путем расчета и анализа секторных *m*-оценок кривизны.

Разработанный метод позволяет контролировать точность оценки и скорость формирования дескриптора, что особенно важно в системах распознавания, где скорость является более критичной, чем точность оценок, т.е. в системах реального и ограниченного времени.

Литература

1. Mokhtarian F.Efficient and Robust Retrieval by Shape Content through Curvature Scale Space / F. Mokhtarian, S. Abbasi, J. Kittler // Int. Workshop on Image DataBases and Multimedia Search. – 1996. – P. 35-42.
2. Bebis G. Recognition Using Curvature Scale Space and Artificial Neural Networks / G. Bebis, G. Papadourakis, S. Orphanoudakis // Proceedings of the IASTED International Conference. – 1998. – P. 27-31.
3. Enrique de Luna Á. A decision support system for ship identification based on the curvature scale space representation / Á. Enrique de Luna, C. Miravet, D. Otaduy, C. Dorronsoro // Electro-Optical Remote Sensing. Proceedings of the SPIE. – 2005. – Vol. 5988. – P. 171-182.
4. Baojiang Zhong. Wenhe Liao Direct Curvature Scale Space: Theory and Corner Detection // IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. – 2007. – Vol. 29(3). – P. 508-512.
5. Белоус Н.В. Применение дескриптора взаимных расстояний контрольных точек для распознавания двумерных геометрических объектов по форме / Н.В. Белоус, Г.А. Кобзарь, А.Н. Ковалев // Украинский научно-теоретический журнал «Вестник Международного Славянского университета». – 2007. – № 6. – С. 111-122.
6. Kopf S. Enhancing curvature scale space features for robust shape classification / S. Kopf, T. Haenselmann, W. Effelsberg // Proceedings to IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME). – 2006. – P. 478-481.
7. Кобзарь Г.А. Модель межмасштабного пространства кривизны для представления формы геометрических объектов // Искусственный интеллект. – 2008. –№ 1. – С. 153-165.
8. Каркищенко А.Н. Об одном способе векторного и аналитического представления контура изображения / А.Н. Каркищенко, А.Е. Лепский, А.В. Безуглов // Сборник трудов Всероссийской научно-технической конференции с участием зарубежных представителей «Интеллектуальные САПР-97». – 1998. – С. 107-112.

Н.В. Белоус, Г.А. Кобзар

Метод швидкої побудови масштабно-просторових представлень кривизни для розпізнавання форм в умовах обмеженого часу

Пропонується уведення секторної m-ваги для оцінки кривизни дискретних контурів об'єктів на зображеннях. Розроблений метод швидкого формування дескрипторів масштабно-просторового представлення кривизни на базі адаптивного спрощення дискретної кривої шляхом розрахунку та аналізу секторних m-оцінок кривизни. Метод дозволяє контролювати точність оцінки та швидкість формування дескриптора, що особливо важливо в системах машинного зору реального та обмеженого часу.

N. Belous, G. Kobzar

Fast Curvature scale-Space Representation Construction for Time-critical Shape Recognition

Introduction of sectoral m-weight for discrete contour curvature estimation is proposed. A technique based on adaptive curve simplification and curvature sectoral m-estimation is developed for fast construction of curvature scale-space descriptors for image contours. Developed technique provides ability to control the robustness of curvature estimation against rapidness of CSS descriptor construction, which is very important for real-time computer vision systems.

Статья поступила в редакцию 22.06.2009.